

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.006

基于 AB 运动控制系统的凸轮曲线研究

杨 钧, 高 强*

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要:针对机械运动件在高速运行下保证平滑性的控制问题, 比较了传统凸轮曲线的控制方法, 研究了五次多项式和正余弦修正的两种凸轮曲线的算法, 提出了针对位置定位和速度定位两种场合下对应合适的应用曲线。在基于 AB 运动控制系统的基础上设计出了适用于高速运行的电子凸轮控制方案。通过实验模拟了运动在不同场合下的两种凸轮曲线的作用效果, 测试记录了速度、电流等实际输出曲线。研究结果表明, 电机运行在这两种凸轮轨迹下, 不仅在加速度及加加速度上能够保证连续性、使系统不会产生冲击, 并且在其曲线的过渡过程中也能保证平滑性、使系统运行更为稳定、使用寿命更长。

关键词:运动控制; 凸轮曲线; 电子凸轮

中图分类号: TH132.47; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)08-1044-06

Study of cam profile based on AB motion control system

YANG Jun, GAO Qiang

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: Aimed at keeping smooth motion when mechanical part is moved at high speed, this article was compared with the traditional solutions, and was described to study the algorithm of 5th order polynomial and modsine cam curves, a proper cam curve was presented for position and velocity control. The electronic cam has been designed based on the AB motion system for high speed control. After the simulation, velocity and current were traced with cam curve control. The results indicate that with the servo running at the two cam curves, not only the acceleration and jerk are keep continuous without impact, but also performance of the system is improved to turn more stable and get a longer lifespan.

Key words: motion control; cam curve; electronic cam

0 引 言

随着电子技术的突飞猛进, 运动控制得到了广泛的应用, 设备的运行速度不断在提高, 控制精度要求也越来越高。而为了实现这些目标, 除了本身器件的硬性指标外, 其控制的算法也起着至关重要的作用。传统的方法有使用梯形、指数等, 虽然在一定程度上得到了速度的连续性, 但是加速度是阶跃性的, 并非连续。在柔性要求较高的场合传统也采用 7 段 S 曲线, 7 段曲线保持了加速度曲线的连续性, 但是其加速曲线都

为线性, 曲线平滑度不够导致加加速度是阶跃性的突变, 在一定程度上会加快机械磨损速度^[1-2]。而梯形、指数曲线的应用在高速运行的过程中经常出现冲击过流等问题, 机械损耗也较大, 影响使用寿命。

国外在运动控制方面的应用早于国内, 在对于运动曲线的优化方面也有不少的研究, 通过电子凸轮来实现曲线的运行轨迹以满足速度和精度都要求比较高的应用场合, 主要服务的行业在印刷、造纸、烟草等, 这些行业现在主流的设备大多采用国外进口。国内在这方面虽然也采用运动控制技术应用于这些领域, 但其

收稿日期: 2015-02-11

作者简介: 杨 钧(1981-), 男, 上海人, 主要从事伺服运动控制应用方面的研究. E-mail: 42526126@qq.com

通信联系人: 高 强, 男, 副教授, 硕士生导师. E-mail: gaoqiang@sjtu.edu.cn

控制方式都比较简单,没有或很少有曲线算法应用于实际工程之中,所以在关键性能上还是无法达到国外的同等水平。

本研究引入两种凸轮曲线的算法,对于高速的位置定位采用5次多项式的凸轮轨迹;对于高速的速度定位则采用正余弦修正的凸轮轨迹,借助AB的控制系统进行硬件和软件的设计,把理论的曲线算法直接应用于工程之中,通过实验结果可验证这两种曲线的合理性。

1 传统凸轮曲线

传统的曲线大多为梯形、指数和7段S曲线^[3-4],梯形曲线的算法包括3个阶段:恒加速、匀速、恒减速。速度和加速曲线如图1(a)所示,速度呈连续线性变化而加速度的变化不是连续的;

指数算法的曲线同样如图1(b)所示,速度和加速度的算法呈现指数形,但在匀速阶段加速度仍存在阶跃跳变的不连续^[5-9];

7段S曲线如图1(c)所示,可以看出速度的变化可以做到平滑、连续地过渡,加速过程分为7个阶段呈连续线性变化,但没有平滑过渡导致加加速度产生阶跃性的变化,没有连续性。

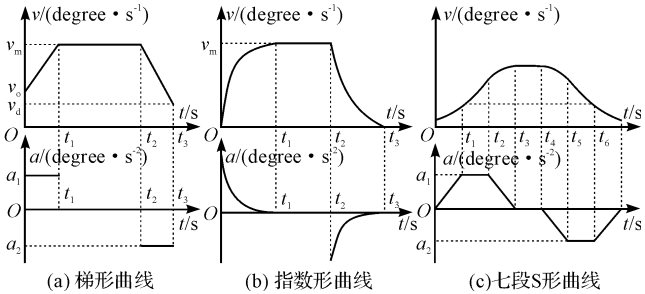


图1 传统曲线

速度和加速度曲线的不平滑对电机和机械机构会产生冲击,电机最大输出电流增大,高速下的系统稳定性变弱,加加速度的不连续性又会加大对机械的磨损速度^[10-11]。故而为了保证速度和加速度的连续性和平滑性,本研究提出了五次多项式和正余弦修正的两种凸轮曲线。

2 两种凸轮曲线算法

2.1 五次多项式曲线算法

五次多项式的算法由三次演变而来,但三次的加速率在起始阶段有断点的存在,使其无法满足高速的应用环境,五次多项式顾名思义根据其变量的最高次方数来定义,如式(1)所示:

$$s = C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t^3 + C_4 \cdot t^4 + C_5 \cdot t^5 \quad (1)$$

式中: s —实际的位移值; t —时间变量; $C_0 \sim C_5$ —不同情况下的固定系数。

通过对式(1)求一阶导和二阶导得出式(2)和式(3):
$$s' = C_1 + 2C_2 \cdot t + 3C_3 \cdot t^2 + 4C_4 \cdot t^3 + 5C_5 \cdot t^4 \quad (2)$$
$$s'' = 2C_2 + 6C_3 \cdot t + 12C_4 \cdot t^2 + 20C_5 \cdot t^3 \quad (3)$$

式中: s', s'' —速度和加速度。对加速度的求导生成加加速度曲线,设在 $t = 0$ 启动的时刻初始位移、速度和加速度都为0,其对应的曲线如图2所示。

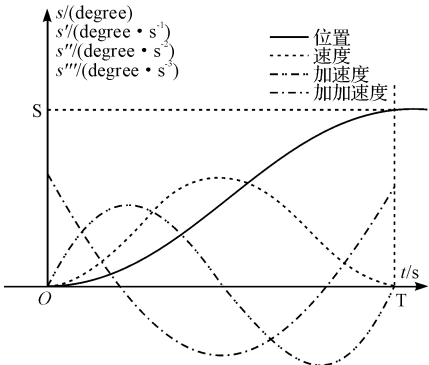


图2 五次多项式曲线

位移总行程记为 S ,对应 t 的总行程时间为 T ,又因为行程结束时的末速度和末加速度回归为零,可以得到以下方程组:

$$\begin{aligned} C_0 = C_1 = C_2 = 0 \\ \begin{cases} C_3 \cdot T^3 + C_4 \cdot T^4 + C_5 \cdot T^5 = S \\ 3 \cdot C_3 \cdot T^2 + 4 \cdot C_4 \cdot T^3 + 5 \cdot C_5 \cdot T^4 = 0 \\ 6 \cdot C_3 \cdot T + 12 \cdot C_4 \cdot T^2 + 20 \cdot C_5 \cdot T^3 = 0 \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

通过计算可以得出式(5):
$$C_3 = 10 \cdot \left(\frac{S}{T^3} \right), C_4 = 15 \cdot \left(\frac{S}{T^4} \right), C_5 = 6 \cdot \left(\frac{S}{T^5} \right) \quad (5)$$

从而得到五次多项式的凸轮曲线公式(6):
$$S = 10 \cdot \left(\frac{S}{T^3} \right) \cdot t^3 + 15 \cdot \left(\frac{S}{T^4} \right) \cdot t^4 + 6 \cdot \left(\frac{S}{T^5} \right) \cdot t^5 \quad (6)$$

由得到的公式可知,在已知给定的总时长和需要走的总行程后,就可以确定时间和位移的函数关系,整个过程的加速度和加加速度不仅连续而且其本身也是多项式函数,曲线各点实现了平滑性过度。

在系统最大允许加速度方面,传统的曲线如梯形运行因为其特性是前后加减速中间匀速,故而最大加速度是在起始和结束段,其能达到的最大值是为在系统总惯量下伺服电机以给出100%额定转矩启动时电机得到的加速度值,而五次多项式曲线的加速度曲线是连续性而非阶跃性的跳变,故而其最大加速度必然小于传统曲线运行产生的最大加速度。由于电机输出的扭矩取决于系统惯量和加速度的乘积,惯量保持不

变,这样系统相比于传统的曲线运行所需的扭矩和电流更小。

因为五次多项式是在初速 V_0 和初加速 A_0 都为零的条件下,位移-时间的函数关系仅取决于总行程和总时长;在 V_0 或 A_0 不为零的情况下,曲线还受这两个因素耦合,在实际工程中该凸轮曲线的算法适用于由零速到零速的位置定位场合。

2.2 正余弦修正曲线算法

正余弦修正曲线是在摆线运动的基础上修正而来的,普通的摆线曲线如图 3 所示。其加速度 α 幅值较大导致电机的输出力矩 $T = J \cdot \alpha$ 上升(J 为系统惯量),且加速度变化率高影响系统稳定性和使用寿命。

正余弦修正曲线如图 4 所示,对加速段分为了三段组合,设横轴总时长为 T ,总行程为 S ,第一段曲线为 $(0 - 1/8)T$,第二段从 $(1/8 - 7/8)T$,第三段为 $(7/8 - 1)T$,每一段的时间 t 和位移 s 的函数关系见式(7):

$$\begin{cases} s = S \left[\frac{\pi}{4 + \pi} \cdot \frac{t}{T} - \frac{1}{4(+4\pi)} \cdot \sin \left\{ 4\pi \cdot \frac{t}{T} \right\} \right] & 0 \leq t \leq \frac{T}{8} \\ s = S \left[\frac{2}{4 + \pi} + \frac{\pi}{4 + \pi} \cdot \frac{t}{T} - \frac{9}{4(+4\pi)} \cdot \sin \left\{ \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{t}{T} + \frac{\pi}{3} \right\} \right] & \frac{T}{8} \leq t \leq \frac{7}{8}T \\ s = S \left[\frac{\pi}{4 + \pi} + \frac{\pi}{4 + \pi} \cdot \frac{t}{T} - \frac{1}{4(+4\pi)} \cdot \sin \left\{ 4\pi \cdot \frac{t}{T} \right\} \right] & \frac{7}{8}T \leq t \leq T \end{cases} \quad (7)$$

对应的各阶段的速度与时间的函数关系见式(8),对应的加速度和时间的函数关系见式(9):

$$\begin{cases} S' = \frac{S}{T} \cdot \frac{\pi}{4 + \pi} \left[1 - \cos \left(4\pi \cdot \frac{t}{T} \right) \right] & 0 \leq t \leq \frac{T}{8} \\ S' = \frac{S}{T} \left[\frac{\pi}{4 + \pi} - \frac{3\pi}{4 + \pi} \cdot \cos \left(4\pi \cdot \frac{t}{T} + \frac{\pi}{3} \right) \right] & \frac{T}{8} \leq t \leq \frac{7}{8}T \\ S' = \frac{S}{T} \left[\frac{\pi}{4 + \pi} - \frac{\pi}{4 + \pi} \cdot \cos \left(4\pi \cdot \frac{t}{T} \right) \right] & \frac{7}{8}T \leq t \leq T \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} S'' = \frac{S}{T^2} \cdot \frac{4\pi^2}{4 + \pi} \cdot \sin \left(4\pi \cdot \frac{t}{T} \right) & 0 \leq t \leq \frac{T}{8} \\ S'' = \frac{S}{T^2} \cdot \frac{4\pi^2}{4 + \pi} \cdot \sin \left(\frac{4\pi}{3} \cdot \frac{t}{T} + \frac{\pi}{3} \right) & \frac{T}{8} \leq t \leq \frac{7}{8}T \\ S'' = \frac{S}{T^2} \cdot \frac{4\pi^2}{4 + \pi} \cdot \sin \left(4\pi \cdot \frac{t}{T} \right) & \frac{7}{8}T \leq t \leq T \end{cases} \quad (9)$$

由式(7)可以得出当在 $t = T/2$ 处时,速度达到最大值 V_1 ,加速度恢复到零,设初速为 V_0 ,得到式(10):

$$V_1 - V_0 = \frac{S}{T} \cdot \frac{4\pi}{4 + \pi} \quad (10)$$

本研究得出最大速和给定的初速之差只和总行程和总时长相关,此时的位移由式(7)得出也恰好在 $S/2$ 处,所以当要求速度在规定的时间或是总行程之内达到指定速度的加速场合之下,可以采用正余弦修正曲线的前半段作为运行轨迹;当要求减速应用的场合下则选用曲线的后半段。两种速度定位场合的应用下利

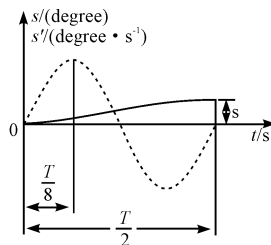


图 3 摆线运动曲线

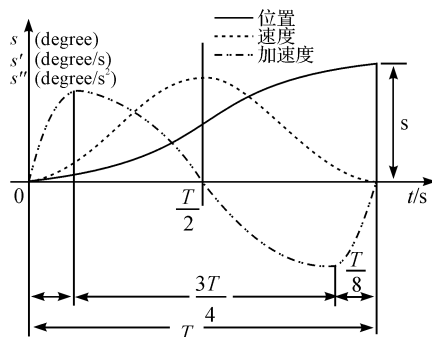


图 4 正余弦修正曲线

用正弦修正曲线的特性保证其加速度和加加速度的连续性和平滑性^[12]。

3 实验设计

针对两种凸轮曲线的应用效果,本研究设计了基于 AB 运动控制系统的硬件架构和软件程序,把两种曲线直接应用于伺服的控制之中,并进行了测试记录。

3.1 硬件设计

实验的 CPU 控制器选用 AB 的集成运动控制功能

的中型控制器,型号选用 1769-L18ERM,该款控制器带有双口以太网,支持 CIPmotion 即以太网控制的伺服运动系统,可以带两个物理伺服轴,程序容量最高可支持到 512 KB。伺服驱动器选用 AB 的 Kinetix5500 系列,选用两个相同型号 2198-H003-ERS 的驱动器作为实验,电机型号选用 VPL-A0631M,此电机采用单电缆技术,电源和编码器采用同一根电缆接入到伺服驱动器之中,电机支持的额定转速是 7 200 r/min,额定扭矩为 0.46 N·m,峰值扭矩可达 1.33 N·m^[13-14]。硬件系统如图 5 所示。

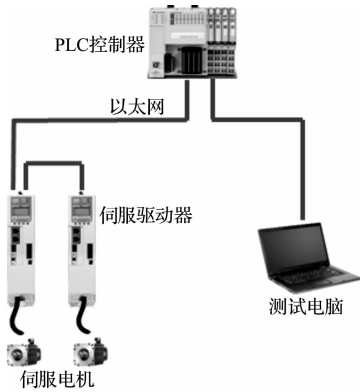


图 5 硬件架构图

3.2 程序设计

编程软件在 AB 的 logix5000 环境下进行组态编程的设计,标准程序和运行控制程序都可以在这款软件下完成。该软件支持梯形、顺序、功能块和语句表的编程语言。

程序设计的流程框图如图 6 所示。

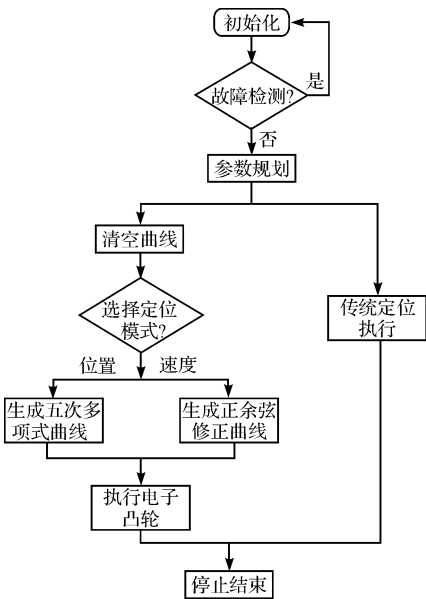


图 6 程序设计流程图

主程序设计功能主要负责对凸轮曲线计算的程序调用、物理轴运行指令调用以及紧急停止和复位的相关功能。对于曲线在程序中的设计,因为考虑到物理轴的轨迹为凸轮曲线,本研究设计成 master 和 slave 的主从轴的位置关系来规划曲线, master 作为主轴采用虚拟轴的方式始终做匀速运行,对应曲线算法中的时间横轴,程序设计把总轨迹分成一百个单位以数组的形式让控制器执行,点与点采用程序中 cubic 弧线的方法连接。

对于五次多项式预先定义好主轴和从轴的总行程变量及初始位置,本研究把先前计算好的系数 $C_0 - C_5$ 编入程序当中,程序执行计算把主从轴每一个单位对应点填入数组之中,其形式为 $cam[x].master$ 和 $cam[x].slave$, x 为数组单位序列,在 1 s 内位置由零位移动到 6 000°(定义电机一圈对应 100°)设计的程序描点曲线如图 7 所示,对应计算出的多项式系数如图中所示。

$$C_0 = C_1 = C_2 = 0, C_3 = 6 \times 10^{-5}, \\ C_4 = -9 \times 10^{-8}, C_5 = 3.6 \times 10^{-11}$$

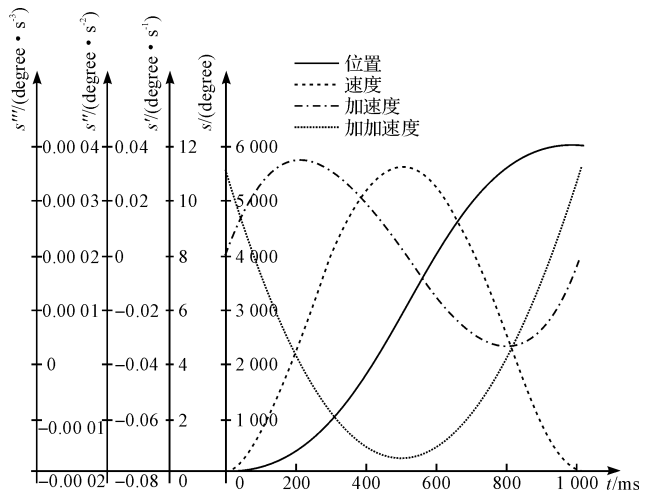


图 7 五次多项式曲线程序描点图

对于正余弦修正曲线除了预先定义主从轴的初始值变量以外,还需要定位初始速度和末速度的变量,用以服务速度定位功能,本研究在程序设计轨迹规划时对三段总行程进行统一设计,根据逻辑判断指令要求如果是加速情况,则选用曲线的前半段存入主从数组中作为执行轨迹,如果是减速情况,则选用曲线的后半段存入主从数组中作为执行轨迹,在 1 s 内加速到 90 r/s 的速度定位设计的程序描点曲线如图 8 所示,其对应的计算曲线公式如式(11)所示:

$$\begin{cases} s = 10\,229.6 \left[\frac{0.439\,9t}{2\,000} - 0.035 \sin\left(\frac{4\pi \cdot t}{2\,000}\right) \right] & 0 \leq t \leq 150 \\ s = 10\,229.6 \left[0.28 + \frac{0.439\,9t}{2\,000} - 0.035 \sin\left(\frac{4\pi \cdot t}{6\,000} + \frac{\pi}{3}\right) \right] & 150 \leq t \leq 1\,850 \\ s = 10\,229.6 \left[0.56 + \frac{0.439\,9t}{2\,000} - 0.035 \sin\left(\frac{4\pi \cdot t}{2\,000}\right) \right] & 1\,850 \leq t \leq 2\,000 \end{cases} \quad (11)$$

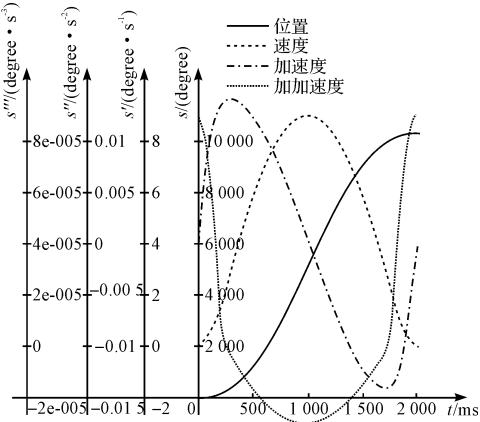


图 8 正余弦修正曲线程序描点图

从图 8 中可以看出在程序中规划出来的曲线其加速从零开始又由零结束,系统冲击变小,并且可以看到加速度和加加速度的曲线都是平滑过渡,系统运行的稳定性加强。

最后,本研究通过软件中凸轮指令 MAPC 来运行物理轴,同时在程序中增加主从轴数组清空程序,当根据变量的不同重新规划曲线轨迹前,对之前的曲线进行清空。

4 测试结果及分析

为了验证两种曲线执行的平滑性,本研究在空载的情况下分别进行了高速位置定位和速度定位的两种测试,每种测试下通过对物理轴 1 采用传统梯形曲线的定位方式和对物理轴 2 采用规划的曲线定位方式进行比较,记录运行过程中伺服电机速度和电流变化趋势。

第一个测试使伺服轴从位置 0 在 1 s 内移动到位置 6 000(对应电机 60 圈处),得到两个测试结果如图 9、图 10 所示。

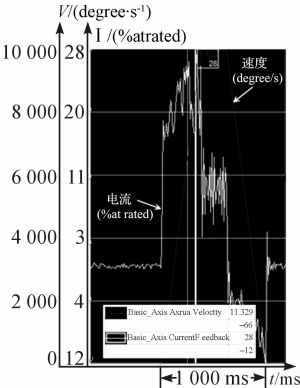


图 9 梯形曲线位置定位

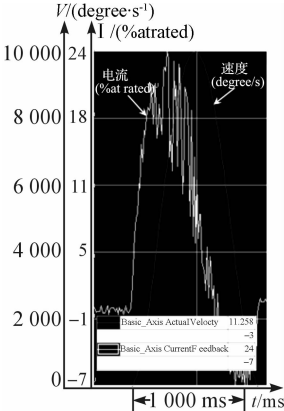


图 10 五次曲线位置定位

图 9 显示电机在加速和减速过程中有阶跃的冲击,电机电流的最大值达到额定的 28%,图 10 显示整个的定位过程中电机的电流始终保持连续性,其电流最大值在 24%。

第 2 个测试使伺服轴由速度 0 在 1 s 内加速到 5 400 r/min,之后保持匀速,得到如下两个测试结果图 11、图 12 所示。

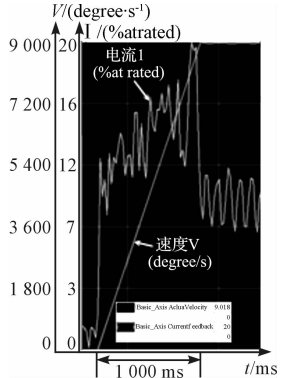


图 11 梯形曲线速度定位速度、电流采集

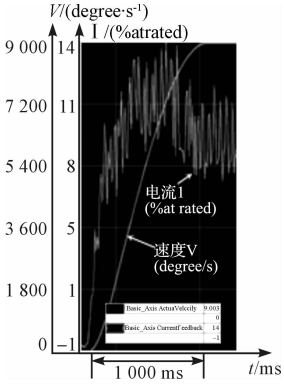


图 12 正余弦修正曲线速度定位速度、电流采集

如图 11 所示,在定速过程中电机电流阶跃性变化,其电流最大值达到额定的 20%,如图 12 所示,电流变化平滑,其最大电流值为 14%。

由两个测试结果可见,根据五次多项式和正余弦修正曲线轨迹运行的伺服轴其扭矩的波动幅值小于传统的梯形曲线,系统冲击变小,并且平滑度也更优于梯形曲线运行的伺服轴。

5 结束语

当前,为了提高生产效率,设备速度被不断提升,但同时又需要保证高精度、高稳定性的要求,传统的曲线轨迹逐渐无法满足这些要求。

本研究通过引入两种不同的凸轮曲线应用于位置定位和速度定位的两种场合之中,成功实现了运动控制在高速下扭矩波动更小,运行更稳定。相信其在汽车、轮胎、机器人、包装等制造业会得到越来越多的应用,并且为适应更高的要求,更加优化的凸轮曲线也会应用于工业领域。

参考文献 (References):

- [1] 张得礼,周来水. 数控运动加工的平滑处理[J]. 航空学报,2006,27(1):125-127.
- [2] 郭新贵,李从心,阮雪榆. 采用线性加速伺服系统的快速准确定位方法[J]. 机械工程学报,2003,39(7):74-77.
- [3] 郑中谦,王兴飞,李 松,等. 基于加减速时间控制的 S 形速度规划新算法研究[J]. 机电工程,2014,31(4):425-

426.

- [4] 杨 超,张冬泉. 基于 S 曲线的步进电机减速的控制[J]. 机电工程,2011,28(7):813-815.
- [5] 许文斌,洪小丽. CAK3665 数控车床进给伺服系统的建模及仿真研究[J]. 机电一体化,2014,5(10):33-34.
- [6] 张 钊,陈 涛,周 勇. 永磁同步电机伺服控制系统建模与仿真[J]. 兵工自动化,2014(4):79-82.
- [7] 任国华. 移动机器人轨迹跟踪与运动控制[J]. 机械设计与制造,2014,54(3):223-225.
- [8] 于 蓬,张为春,裴宝浩,等. 抢险机器人手臂机液耦合仿真分析[J]. 液压气动与密封,2011(6):29-33.
- [9] 赖厚安. 基于运动仿真的双层凸轮曲线设计与分析[J]. 机械工程师,2014,72(5):98-100.
- [10] 邵世权,刘 霞. 凸轮轮廓曲线方程形式的探讨与研究[J]. 机械研究与应用,2014,34(3):136-137.
- [11] 王云飞,郎需林,张承瑞,等. 高速并联机械手最优加减速控制算法研究[J]. 机械设计与制造,2014,59(11):628-629.
- [12] ROTHBART H A, EMERITUS D. CAM DESIGN HANDBOOK. Chapter3: Modified Cam Curves [J]. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2004,48(7):83-87.
- [13] Rockwell Automation Inc. CompactLogix Controllers Specifications Technical Data[M]. Milwaukee: Rockwell,2012.
- [14] Rockwell Automation Inc. Kinetix5500 servo drive user manual[M]. Milwaukee: Rockwell,2012.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

杨 钧,高 强. 基于 AB 运动控制系统的凸轮曲线研究[J]. 机电工程,2015,32(8):1044-1049.

YANG Jun, GAO Qiang. Study of cam profile based on AB motion control system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(8):1044-1049.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>